

## Algunas observaciones Clase 6: Microfísica de nubes. Nucleación

### Teoría de la nucleación

El incremento neto de energía debido a la formación de una gotita de área  $A$  y volumen  $V$  viene dado por:

$$\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l) \quad (6.1)$$

donde  $\sigma$  es el trabajo requerido para crear una unidad de área de la interfaz vapor-líquido (llamada la *energía interfacial* entre el vapor y el líquido, o la *energía superficial* del líquido) y por lo tanto  $A\sigma$  es el trabajo total para crear la gotita;  $\mu_l$  y  $\mu_v$  son las energías libres de Gibbs por molécula en las fases líquido y vapor;  $n$  es el número de moléculas de agua por unidad de volumen de líquido, y por lo tanto  $nV(\mu_v - \mu_l)$  es el decrecimiento en la energía libre de Gibbs del sistema debido a la condensación (tomando como sistema la gotita). Aquí suponemos que las condiciones de presión y temperatura pueden no ser las de equilibrio sino el caso general en el que entonces las energías de Gibbs no son iguales para cada fases.

Ahora tomamos la entalpía:

$$h = u + p\alpha = c_p T$$

y reemplazando en la definición general de Gibbs:

$$G = u + p\alpha - T\phi = c_p T - T\phi$$

$$\Rightarrow dG = c_p dT - \phi dT - T d\phi$$

Considerando condensación a  $T = \text{cte}$ :

$$dG = -T d\phi$$

y entonces también:

$$d\phi = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = -R \frac{dp}{p}$$

por lo tanto:

$$dG = TR \frac{dp}{p}$$

Planteamos Gibbs por molécula, entonces dividimos por  $N_a$ :

$$d\mu = T \frac{R}{N_a} \frac{dp}{p}$$

y llamamos  $k = \frac{R}{N_a}$ , constante de Boltzman.

Integrando:

$$\int_{\mu_l}^{\mu_v} d\mu = kT \int_{e_s}^e \frac{dp}{p}$$

$$\Rightarrow \mu_v - \mu_l = kT \ln\left(\frac{e}{e_s}\right)$$

y reemplazamos en (6.1) para obtener (6.4).

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi R^3 n k T \ln \frac{e}{e_s} \quad (6.4)$$

Esta energía pone una barrera en el crecimiento de gotitas por condensación espontánea (colisiones casuales de moléculas de vapor) y en principio las gotitas están continuamente condensándose y evaporándose (cuando se condensan aumenta la energía y cuando se evaporan disminuye). En condiciones de subsaturación ( $e < e_s$ ) es imposible el crecimiento porque eso representa un constante aumento de energía. Solo en condiciones de sobresaturación ( $e > e_s$ ) podría alcanzarse un radio crítico  $r$  a partir del cual el crecimiento implicaría una disminución de energía. Pero ese radio es

demasiado grande, se requeriría una sobresaturación que en la atmósfera real nunca se da. Por lo tanto la *nucleación homogénea* en la atmósfera real es inviable.

Sin embargo, en presencia de partículas (aerosoles), sobre todo solubles en agua, la sobresaturación requerida para la condensación sobre ellas es mucho menor que la requerida para la nucleación homogénea. Este sería el caso de la *nucleación heterogénea*, y es la que realmente se da en la atmósfera.

### Ejercicios

Hacer los ejercicios: 6.1; 6.9; y 6.12.